

# Pemanfaatan Limbah Kerak Cangkang Sawit Terhadap Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi

Lissa Opirina<sup>1</sup>, T. Budi Aulia<sup>2</sup>, Mochammad Afifuddin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Sipil Universitas Teuku Umar, Meulaboh Aceh Barat 23615, <sup>2,3</sup> Jurusan Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh,  
email: <sup>1</sup>[lissaopirina@gmail.com](mailto:lissaopirina@gmail.com), <sup>2</sup>[bdaulia@gmail.com](mailto:bdaulia@gmail.com), <sup>3</sup>[afifmoch@yahoo.com](mailto:afifmoch@yahoo.com)

## Abstract

*The infrastructure as civil building and bridge were depend on concrete materials. Technology development and advance in infrastructure due to find the quality of the material. Meanwhile, material availability are decreasing from natural rock and river. Because of that, continuous research need to be done with the use of substitute aggregates. This study aimed to analyze the flexural capacity of reinforced concrete beams of high quality with a substitutes aggregate namely palm oil clinkers as 40% from the volume of coarse aggregate. In this study tested 2 pieces beam with 15 x 30 x 220 cm sized for the substitution of the aggregate and the test specimen normal beam. The test object is designed to undergo bending failure. Quality steel (fy) used for the principal reinforcement of 445.63 MPa and shear reinforcement amounted to 381.97 MPa, tensile reinforcement using a screw diameter of 15.8 mm, 11.9 mm diameter rebar press screw and shear reinforcement diameter 11.9 mm screw. High Quality Concrete compressive strength (BMT) without variation additives and substitutes aggregate (normal) obtained at 60.652MPa with FAS0.30. The results showed that all the beams undergo bending failure as planned. The result of bending capacity for normal beam is 2,696. The maximum deflection for BMT with palm oil clinkers coarse aggregate substituton (CSAK) by the percentage of the amount of deflection of the normal BMT amounted to 112.057% with a maximum load 208570 kN. Comparison BMT beam ductility of CSAK BMT to block the normal BMT amounted to 113.936%. It can be concluded that substitution coarse aggregate can increase the value of deflection and ductility of high quality concrete.*

**Keywords:** High Strength Reinforced Concrete Beam, Bending Capacity, Aggregates Substitution.

## Abstrak

Pembangunan infrastruktur sipil seperti gedung dan jembatan masih sangat bergantung pada material beton. Perkembangan teknologi dan kemajuan dalam pembangunan infrastruktur menuntut kita untuk terus mencari cara mendapatkan material yang berkualitas. Sementara itu ketersediaan material yang berasal dari sungai dan batuan alam semakin berkurang jumlahnya. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang penggunaan material pengganti tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas lentur balok beton bertulang mutu tinggi dengan substitusi agregat kasar yaitu bongkahan kerak cangkang sawit yang merupakan limbah dari pengolahan pabrik kelapa sawit sebesar 40% dari volume agregat kasar. Pada penelitian ini diuji dua buah balok berukuran 15 x 30 x 220 cm, yaitu untuk substitusi agregat kasar sebanyak satu benda uji dan satu benda uji balok normal. Benda uji didisain untuk mengalami gagal lentur. Mutu baja (fy) yang digunakan untuk tulangan pokok sebesar 445,63 MPa dan tulangan geser sebesar 381,97 MPa, tulangan tarik yang digunakan berdiameter 15,8 mm ulir, tulangan tekan diameter 11,9 mm ulir dan tulangan geser diameter 11,9 mm ulir. Nilai kuat tekan beton tanpa substitusi agregat (normal) yang didapat sebesar 60,652 MPa dengan FAS 0,30. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua balok mengalami gagal lentur sesuai yang direncanakan. Kapasitas lentur balok normal yang dihasilkan sebesar 2,696. Lendutan maksimum pada BMT Cangkang Sawit Agregat Kasar (CSAK) dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 112,057% dengan beban maksimum 208,570 kN. Perbandingan daktilitas balok BMT CSAK terhadap balok BMT normal sebesar 113,936%. Dapat disimpulkan bahwa substitusi agregat kasar dapat meningkatkan nilai lendutan dan daktilitas pada beton mutu tinggi.

**Kata kunci :** Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi, Kapasitas Lentur, Substitusi Agregat.

## 1. PENDAHULUAN

Tanaman kelapa sawit saat ini tersebar hampir diseluruh provinsi di Indonesia. Berdasarkan buku statistik komoditas kelapa sawit terbitan Ditjen Perkebunan, tahun 2014 luas areal kelapa sawit mencapai 10,9 juta Ha dengan produksi 29,3 juta ton CPO. Perkebunan kelapa sawit Indonesia menjadi primadona dan mampu mencapai perkembangan seperti sekarang ini, sehingga Indonesia menjadi negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Di Provinsi Aceh, lahan perkebunan kelapa sawit tersebar hampir pada seluruh wilayah dengan luas area total yang telah dimanfaatkan sebesar 368.648 Ha [4].

Produksi kelapa sawit selain menghasilkan minyak juga menghasilkan produk samping berupa limbah kelapa sawit. Limbah yang dihasilkan dari pengolahan kepala sawit sekitar 60 % dari jumlah produksi buah kelapa sawit [8]. Limbah sisa pembakaran cangkang sawit pada suhu tinggi menghasilkan kerak yang lazim dikenal kerak tanur tinggi atau kerak *boiler* cangkang sawit.

Pemakaian beton sebagai bahan utama konstruksi bangunan sudah tidak diragukan lagi keunggulannya [2]. Dalam pembangunan gedung-gedung bertingkat tinggi, jembatan dengan bentang panjang, tower dan sebagainya dibutuhkan beton dengan kekuatan tinggi untuk menahan semua beban dengan dimensi komponen yang cukup ramping, beton mutu tinggi merupakan pilihan yang paling tepat [11]. Beton mutu tinggi dibentuk dengan nilai FAS yang rendah, sehingga membutuhkan semen dalam jumlah yang besar, agregat serta penggunaan bahan tambahan / *additive* dan *admixture superplasticizer*. Sementara itu ketersediaan material yang berasal dari sungai dan batuan alam semakin lama semakin berkurang jumlahnya. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang penggunaan material pengganti tersebut. Beberapa penelitian mengenai pemakaian limbah kelapa sawit, baik berupa abu maupun bongkahan, sebagai bahan substitusi semen atau agregat terhadap teknologi beton diharapkan dapat memperbaiki sifat beton dan dapat mengurangi limbah industri.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memanfaatkan limbah industri dari bahan bongkahan kerak cangkang sawit sebagai substitusi agregat kasar dalam menganalisis kapasitas lentur balok beton bertulang mutu tinggi. Pada penelitian ini balok beton bertulang mutu tinggi dengan substitusi agregat akan dibandingkan dengan balok beton bertulang mutu tinggi tanpa substitusi agregat (normal). Diharapkan dari hasil penelitian ini didapatkan substitusi agregat kasar yang dapat memperbaiki nilai kapasitas lentur beton mutu tinggi.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Kerak cangkang sawit merupakan limbah padat sisa pembakaran buah kelapa sawit yang tidak dimanfaatkan lagi oleh pabrik. Menurut hasil penelitian [7] limbah pembakaran serat dan cangkang sawit berupa abu dan kerak yang memiliki unsur yang bermanfaat untuk meningkatkan kekuatan mortar.

Dari hasil penelitian terdahulu terhadap sifat fisis kerak cangkang sawit dan kandungan kimianya didapatkan data seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2 [5].

Table 1. Sifat Fisis Kerak Cangkang Sawit

Sifat-sifat Fisis BCS	Hasil rata-rata penelitian
Berat jenis keadaan kering permukaan (SSD)	1,660
Berat jenis keadaan kering (OD)	1,637
Durabilitas	13,2%
Daya serap air	1,409%
Diameter	Lolos = 19,1 mm, Tertahan = 4,76 mm

(Sumber : Kurniawan, 2011)

Tabel 2. Komposisi Kandungan Kimia Bongkahan Cangkang Sawit

Unsur Kimia	Persentase (%)
Silika Dioksida (SiO <sub>2</sub> )	38,128
Aluminium Oksida (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10,302
Besi Oksida (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,898
Kalsium Oksida (CaO)	3,926
Magnesium Oksida (MgO)	3,649
Hilang Pijar (LOI)	0,685

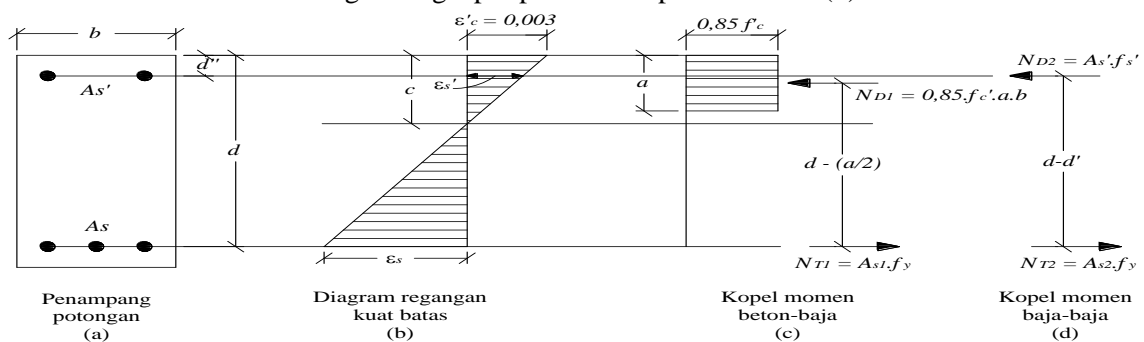
(Sumber : Kurniawan, 2011)

### Kekuatan Balok Beton Bertulang

Dalam desain kekuatan batas (ultimit), balok didesain untuk mulai gagal pada beban yang diperbesar. Pada taraf ini, baja diharapkan telah melampaui titik lelehnya, sementara beton diharapkan telah memasuki daerah plastis.

#### 1. Kuat lentur balok

Analisis balok bertulangan rangkap diperlihatkan pada Gambar (1) berikut :



Gambar 1. Distribusi Tegangan Pada Penampang Balok Tulangan Rangkap  
Sumber : Dipohusodo (1994)

[9] menyatakan analisis lentur balok bertulangan rangkap menyangkut penentuan kuat nominal momen suatu penampang ( $M_n$ ) dengan nilai-nilai  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $d'$ ,  $A_{s1}$ ,  $A_{s'}$ ,  $f'_c$ , dan  $f_y$  dapat ditulis dengan persamaan berikut.

$$M_{n1} = A_{s1} \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$M_{n2} = A_{s'} \cdot f_y \cdot (d - d') \dots \dots \dots (2)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots \dots \dots (3)$$

Tinggi blok tegangan beton :

$$a = \frac{A_{s1} f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots \dots \dots (4)$$

Letak garis netral :

$$C = \frac{a}{\beta} \dots \dots \dots (5)$$

dimana :

$M_n$  = Kuat nominal momen lentur (kg.cm);

$a$  = Tinggi blok tegangan tekan (cm);

$C$  = Jarak serat terluar ke garis netral (cm);

$d$  = Jarak dari serat terluar ke pusat tulangan tarik (cm); dan

$d'$  = Jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tekan (cm).

## 2. Kuat geser balok

Dalam perencanaan kekuatan geser, [6] meninjau kekuatan geser nominal ( $V_n$ ) sebagai jumlah dari dua bagian :

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) \dots\dots\dots (6)$$

dimana:

- $V_n$  = Kekuatan geser nominal (kg) ;  
 $V_c$  = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (kg);  
 $V_s$  = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan geser (kg)

Kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk menahan gaya geser dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (7) :

$$V_c = \left( \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \right) b_w d \dots\dots\dots (7)$$

dimana :

- $V_c$  = Kapasitas geser beton (N) ;  
 $f'_c$  = Kuat tekan beton (MPa) ;  
 $b_w$  = Lebar balok (mm) ; dan  
 $d$  = Tinggi efektif penampang beton (mm).

Menurut [9], untuk tulangan geser,  $V_s$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8 :

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \dots\dots\dots (8)$$

dimana :

- $V_s$  = Gaya geser nominal yang disediakan oleh tulangan sengkang (N) ;  
 $A_v$  = Luas penampang tulangan sengkang (mm<sup>2</sup>);  
 $f_y$  = Kuat luluh tulangan geser (MPa);  
 $d$  = Tinggi efektif penampang balok beton bertulang (mm); dan  
 $s$  = Jarak pusat ke pusat batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok memanjang (mm).

## Lendutan

Menurut [9], lendutan yang terjadi pada balok yang dibebani pada dua titik pembebanan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\Delta_{ultimit} = 0,125 \times \phi_u \times l^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\phi_u = 0,7 \frac{\epsilon_u}{c} [100(\rho - \rho')]^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\rho - \rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ Jika } (\rho - \rho' < 0.03) \dots\dots\dots (10)$$

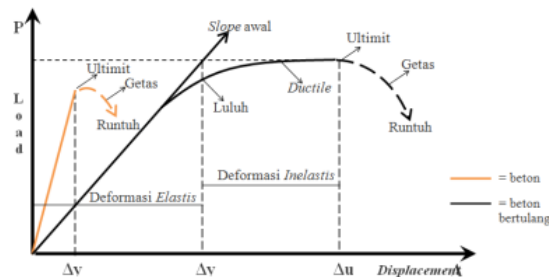
$$\phi_u = \frac{\epsilon_u}{c} \text{ Jika } (\rho - \rho' > 0.03) \dots\dots\dots (11)$$

dimana :

- $\Delta_{ult}$  = Lendutan beban ultimit di tengah bentang (mm);  
 $\phi_u$  = Kurvatur ultimit (rad/mm);  
 $L$  = Panjang bentang (mm);  
 $\epsilon_u$  = Regangan ultimit pada beton;  
 $c$  = Jarak serat terluar ke garis netral (mm);  
 $\rho$  = Rasio tulangan tarik ( $A_s / b.d$ ); dan  
 $\rho'$  = Rasio tulangan tekan ( $A'_s / b.d$ ).

## Daktilitas

Daktilitas struktur ketika menerima beban merupakan pertimbangan penting bagi perencanaan bangunan dan merupakan sifat struktural yang dijadikan standar kelayakan untuk mengontrol kerusakan [12]. Perilaku beton yang bersifat daktail dan getas dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perilaku daktail dan getas pada beton.

Sumber : Punmia, B.C. at al, 2007

Daktilitas dapat dihitung dengan Persamaan 12 :

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \dots\dots\dots (12)$$

dimana:

- $\mu$  = Daktilitas ;
- $\Delta u$  = Regangan pada saat beban puncak ;
- $\Delta y$  = Regangan pada saat luluh.

## 3. METODOLOGI PENELITIAN

### Prosedur Penelitian

#### 1. Perencanaan balok beton bertulang mutu tinggi

Perhitungan awal mengenai kapasitas momen lentur dilakukan guna mendapatkan gambaran apakah benda uji balok yang direncanakan mengalami gagal lentur. Berdasarkan analisis yang dilakukan untuk mendapatkan benda uji gagal menahan beban lentur maka didapat ukuran dan jumlah tulangan seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Ukuran dan Jumlah Tulangan Benda Uji

Variasi Benda Uji	Benda Uji Balok	Dimensi Balok	Tulangan Pokok		Tulangan Geser	Jumlah
			Tekan	Tarik		
Beton Bertulang Mutu Tinggi Normal	BMT Normal	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1
Beton Bertulang Mutu Tinggi Cangkang Sawit Agregat Kasar	BMT CSAK	15 cm x 30 cm x 220 cm	2D11,9	4D15,8	D11,9-100	1

#### 2. Pembuatan Benda Uji

Pada Tabel 4 dapat dilihat jumlah dan variasi benda uji.

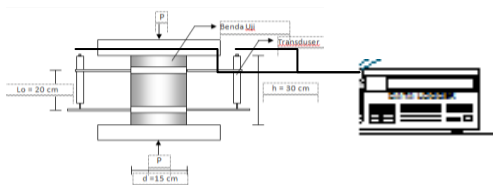
Tabel 4 : Jumlah dan variasi perlakuan benda uji.

Variasi Benda Uji	Benda Uji	Pengujian	Jumlah Masing-masing	Jumlah Total
BMT Normal dan BMT Substitusi Agregat Kasar (CSAK)	Silinder diameter 15 cm x tinggi 30 cm	Kuat Tekan	4	8
	Balok 15 cm x 15 cm x 60 cm	Kuat Tarik Lentur Murni	3	6
	Balok 15 cm x 30 cm x 220 cm	Lentur	1	2

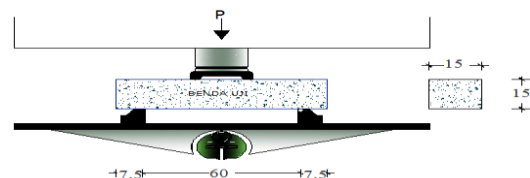
Benda uji untuk pengujian kuat lentur adalah balok ukuran 15 cm x 30 cm x 220 cm, sedangkan balok ukuran 15 x 15 x 60 cm untuk pengujian lentur murni, dan silinder ukuran diameter 15 cm x tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tekan sebagai benda uji kontrol.

### 3. Pengujian kuat tekan

Pengujian tekan dilakukan dengan memberikan beban arah vertikal atau sejajar secara perlahan-lahan hingga benda uji hancur. Seperti Gambar 3 berikut :



Gambar 3. Pengujian Kuat Tekan Silinder



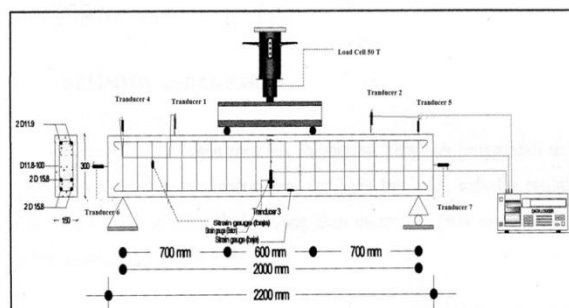
Gambar 4. Pengujian Kuat Tarik Lentur

### 4. Pengujian kuat lentur

Pengujian dilakukan dengan sistem balok sederhana dengan beban terpusat pada dua titik. Beban dari mesin uji disalurkan melalui plat baja untuk diteruskan ke balok menjadi beban titik masing-masing pada jarak 1/3 bentang, seperti terlihat pada Gambar 4.

### 5. Pengujian kuat lentur beton bertulang

Set up pengujian benda uji balok dapat dilihat pada Gambar 5. Adapun perilaku yang diamati adalah retak yang terjadi yaitu retak awal dan pola retak, lendutan, regangan baja dan beton, beban maksimum yang dipikul oleh balok dan pola kehancuran yang terjadi.



Gambar 5. Set Up Pembebanan Benda Uji Balok

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Hasil

##### 1. Pengujian kuat tekan BMT dengan substitusi agregat

Diperlihatkan pada Tabel 5 di bawah ini yaitu hasil kuat tekan ( $f'_c$ ) benda uji silinder diameter 15 cm x tinggi 30 cm BMT substitusi agregat.

Tabel 5. Rekapitulasi Kuat Tekan Silinder

Variasi Benda Uji	Dimensi Benda Uji		Luas (cm <sup>2</sup> )	Beban (kg)	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (MPa)	$f'_c$ rata-rata (MPa)
	Tinggi	Diameter					
NORMAL HSC	30,31	15,10	179,08	106000	591,92	58,07	60,65
	30,14	15,15	180,27	108000	599,11	58,77	
	30,20	15,05	177,78	118000	663,75	65,11	
CSAK	30,09	14,98	176,13	121000	687,01	67,40	67,50
	30,36	14,93	174,95	122000	697,33	68,41	
	30,27	14,99	176,48	120000	679,97	66,70	

##### 2. Hubungan tegangan-regangan BMT dengan substitusi agregat

Berdasarkan data yang diperoleh, di buat grafik hubungan tegangan-regangan BMT dengan cara menghitung tegangan-regangan setiap interval pada kenaikan beban 200 kg dan disesuaikan dengan pemberian beban sampai benda uji hancur. Rekapitulasi nilai tegangan-regangan maksimum benda uji silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Rekapitulasi Nilai Tegangan-regangan

Variasi Benda Uji	Beban (P) (Kg)	Tegangan (MPa)	Regangan Maksimum
Normal HSC	108000	61,115	0,00159
CSAK	116000	65,643	0,00256

##### 3. Pengujian kuat tarik lentur BMT dengan substitusi agregat

Rekapitulasi nilai kuat lentur BMT substitusi agregat dengan benda uji balok 15 cm x 15 cm x 60 cm yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik Lentur

Variasi Benda Uji	Nama Benda Uji	Berat Benda Uji	Dimensi Benda Uji			Beban (P)	Kuat Tarik (fr)	Kuat Tarik Rata-rata (fr)
			Panjang	Lebar	Tinggi			
		(kg)	(cm)	(cm)	(cm)	(kg)	(Mpa)	(Mpa)
BMT Normal	BTL.1	33.85	60	15	15	4020	5.464	5.351
	BTL.2	33.93	60	15	15	3850	5.233	
	BTL.3	33.9	60	15	15	3940	5.355	
CSAK	BTL.1	28.06	60	15	15	4690	6.374	6.388
	BTL.2	28.25	60	15	15	4740	6.442	
	BTL.3	28.3	60	15	15	4670	6.347	

## 4. Pengujian kuat tarik baja

Data hasil tegangan luluh, regangan luluh dan modulus elastisitas baja untuk masing-masing diameter diperlihatkan pada Tabel 8 dibawah ini.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Uji Tarik Baja

No	Diameter	No. Benda Uji	Tegangan Leleh	Tegangan Leleh Rata-rata	Regangan Leleh	Modulus Elastisitas	Modulus Elastisitas Rata-Rata	Jenis Besi
	mm		(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1	11,9	BU. 1	3947,04	3819,72	0,195	2026723	2086732	Ulir
		BU. 2	3692,39		0,172	2146741		
2	15,8	BU. 1	4710,99	4456,34	0,248	1903429	1964170	Ulir
		BU. 2	4201,69		0,208	2024911		

## 5. Perbandingan Hasil Pengujian Balok BMT Normal dengan Substitusi agregat

## a. Beban dan lendutan

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa balok BMT normal memiliki lendutan maksimum sebesar 23,14 mm pada beban 25,17 ton, sedangkan balok BMT CSAK memiliki lendutan maksimum sebesar 25,93 mm pada beban 25,03 ton.

## b. Beban dan regangan baja tarik

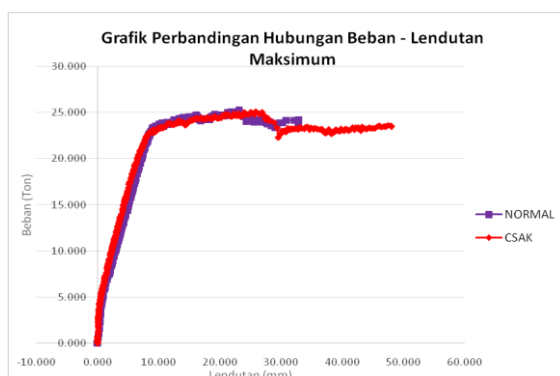
Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa Balok BMT normal memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar 103,108  $\mu\epsilon$  atau 0,0103 pada beban 24,24 ton. Balok BMT CSAK memiliki regangan baja tulangan tarik sebesar 80,897  $\mu\epsilon$  atau 0,00809 pada beban 25,03 ton.

## c. Beban dan regangan baja geser

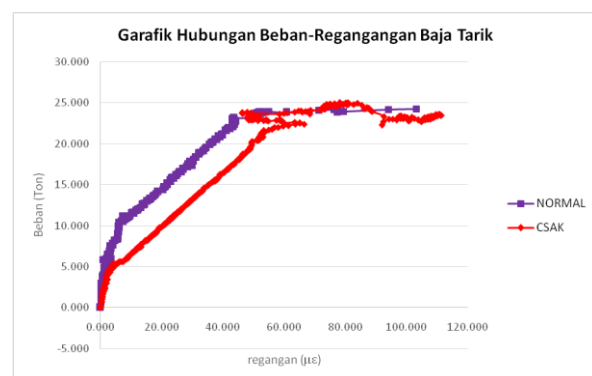
Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa balok BMT pada masing – masing variasi memiliki regangan baja tulangan geser yang lebih kecil dibandingkan dengan regangan baja tulangan tarik. Balok BMT normal memiliki regangan baja tulangan geser sebesar 14,454  $\mu\epsilon$  pada beban 25,17 ton. Balok BMT CSAK memiliki regangan baja tulangan geser sebesar 9,431  $\mu\epsilon$  pada beban 25,03 ton.

## d. Beban dan regangan beton

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa balok BMT normal memiliki regangan beton sebesar 238,095  $\mu\epsilon$  pada beban 24,17 ton. Balok BMT CSAK memiliki regangan beton sebesar 416,202  $\mu\epsilon$  pada beban 25,03 ton. Terlihat pada balok dengan substitusi agregat, regangan yang terbaca pada grafik tetap linier.

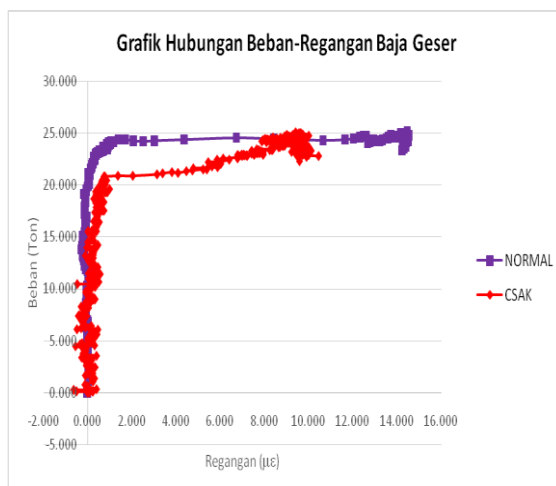


Gambar 6

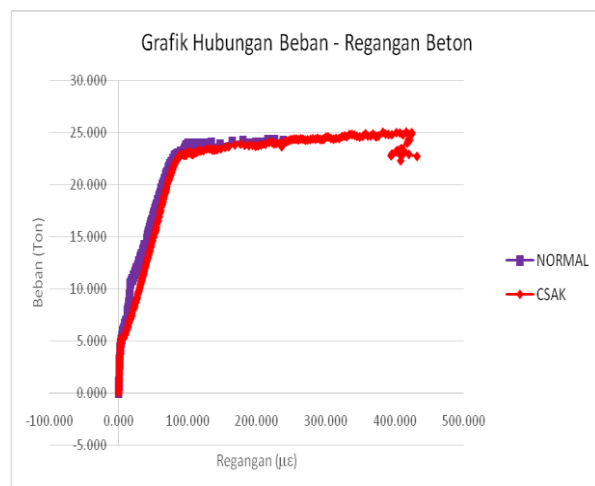


Gambar 7





Gambar 8



Gambar 9

- e. Perbandingan hasil teoritis dan laboratorium terhadap kapasitas balok BMT normal dengan substitusi agregat

Dari hasil perbandingan nilai kapasitas balok dengan substitusi agregat yang diperlihatkan pada Tabel 9 dapat disimpulkan bahwa untuk beton mutu tinggi dengan substitusi agregat dapat meningkatkan kuat lentur beton mutu tinggi dibandingkan dengan beton mutu tinggi normal.

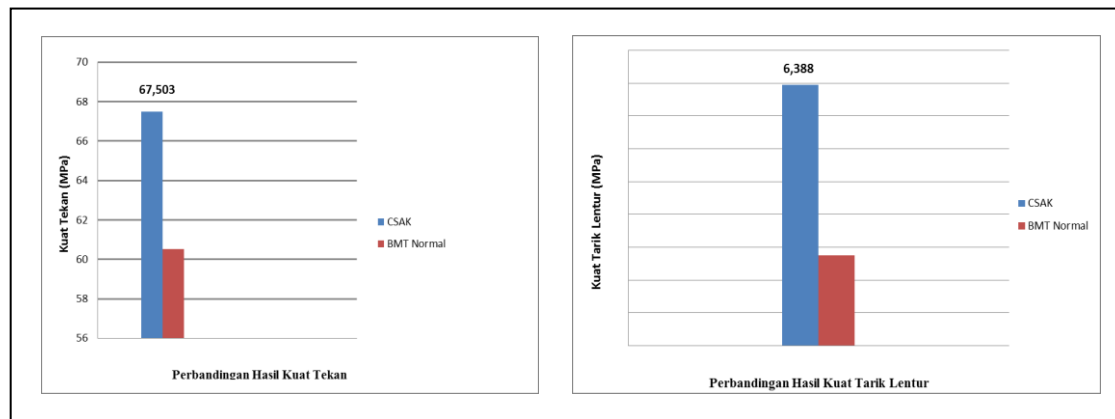
Tabel 9 : Perbandingan Kapasitas Balok BMT Normal dengan Balok BMT Substitusi Agregat Terhadap Teoritis dan Laboratorium

Benda Uji Balok	$f_c$ (Mpa)	$f_y$ lentur (Mpa)	$f_y$ geser (Mpa)	Jarak Sengkang (mm)	Berat Benda Uji (Kg)	Perbandingan Hasil									
						Beban Maksimum (KN)				Momen Lentur (KN.m)			Lendutan (mm)		
						Pu	Plab	Plab / Pu	Plab / Berat	Mn	Mlab	Mlab / Mn	$\Delta$ teori	$\Delta$ lab	$\Delta$ lab/ $\Delta$ teori
NORMAL HSC	60,650	445,634	381,972	10,000	270,000	206,551	246,916	1,195	93,222	72,293	86,421	1,195	16,919	23,140	1,368
CSAK	67,500	445,634	381,972	10,000	255,000	208,570	245,543	1,177	98,157	73,000	85,940	1,177	21,684	25,930	1,196

## 4.2 Pembahasan

Kuat tekan dan kuat tarik lentur BMT Normal dan substitusi agregat

Berdasarkan Gambar 10 dapat dilihat nilai kuat tekan dan kuat tarik lentur BMT substitusi agregat meningkat dibandingkan dengan BMT normal. Substitusi agregat dalam campuran beton akan berpengaruh terhadap kekuatan tekan dan tarik beton. Jika dihubungkan dengan momen nominal yang terbentuk, semakin tinggi nilai kuat tekan yang dihasilkan semakin rendah nilai blok tegangan tekan, maka semakin tinggi nilai momen nominal yang terbentuk. Pengujian kuat tarik lentur ini juga didapat untuk mengetahui retak awal pada balok BMT dan dijadikan sebagai acuan pada saat pengujian balok beton bertulang.



Gambar 10. Diagram Kuat tekan dan Kuat Tarik Lentur BMT Normal dan substitusi agregat.

Kuat Lentur Balok BMT Variasi Aditif dan Substitusi Agregat :

### 1. Lendutan

Tabel 10. Perbandingan Lendutan Balok BMT Normal dengan Balok BMT Substitusi Agregat

Benda Uji Balok	Lendutan Maks (mm)	Perbandingan Lendutan Terhadap Lendutan BMT Normal	
		Persen (%)	Selisih (%)
NORMAL HSC	23.140	100.000	-
CSAK	25.930	112.057	12.057

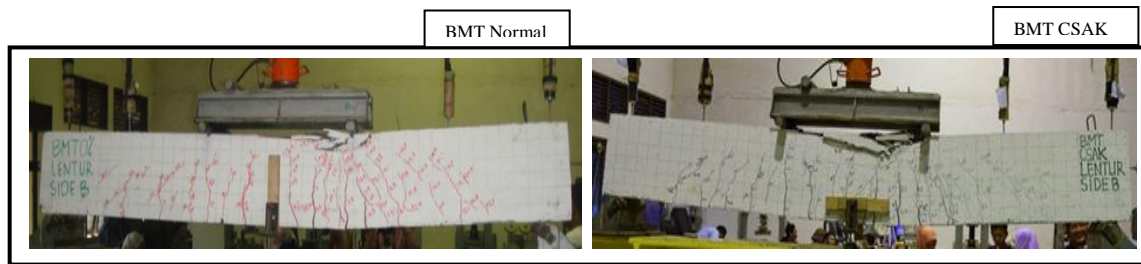
Dapat dibahas dari nilai lendutan pada Tabel 10 Perbandingan lendutan balok BMT dengan substitusi agregat terhadap balok BMT normal cenderung dapat meningkatkan nilai lendutan balok beton mutu tinggi. Lendutan maksimum pada BMT CSAK dengan persentase besarnya lendutan terhadap BMT normal sebesar 112,057 %, meningkat 12,057 % dari BMT normal, hal ini dikarenakan kerak cangkang sawit memiliki tekstur permukaan yang relatif lebih kasar sehingga ikatan antar material dalam campuran beton (*bond*) lebih kuat.

### 2. Retak dan *Fracture*/gagal

Retak yang terjadi pada pengujian balok BMT dengan substitusi agregat dapat dilihat pada Tabel 11 dibawah ini. Dari Tabel 11 dapat disimpulkan bahwa substitusi agregat dapat meningkatkan beban terjadinya retak awal pada balok beton bertulang mutu tinggi.

Tabel 11. Hasil Uji Laboratorium

Benda Uji Balok	Retak Pertama					Peralihan					Beban Maksimum				
	P (ton)	Lendutan (mm)	Regangan Baja		Regangan Beton	P (ton)	Lendutan (mm)	Regangan Baja		Regangan Beton	P (ton)	Lendutan (mm)	Regangan Baja		Regangan Beton
			Tarik	Geser				Tarik	Geser				Tarik	Geser	
NORMAL HSC	3,520	0,540	0,728	-0,021	1,533	23,480	9,700	49,430	0,760	96,898	25,170	23,140	0,000	14,454	0,000
CSAK	4,000	0,330	2,342	-0,085	2,002	23,070	9,540	48,108	7,891	109,525	25,030	25,930	80,897	9,431	416,202



Gambar 11. Pola Retak Balok BMT dengan Substitusi Agregat

Jumlah retak semakin banyak seiring dengan penambahan beban. Balok BMT normal pada saat beban maksimum salah satu retak lentur membesar sampai pada bagian balok atau beton telah luluh selanjutnya diikuti luluh tulangan lentur dan dapat dikatakan balok tersebut getas. Sementara itu BMT dengan substitusi agregat, pada beban lebih besar dari 75% beban maksimum terjadi perubahan grafik hubungan beban – lendutan dari linier ke plastis disini menunjukkan bahwa tulangan lentur telah luluh perlahan dan diikuti dengan luluhnya beton atau dengan kata lain substitusi agregat kedalam beton mutu tinggi dapat meminimalisir sifat getas. Pembentukan retak pada umumnya dari setiap benda uji berbeda-beda, tetapi kehancuran yang terjadi sama yaitu kehancuran lentur atau gagal lentur. Hal ini di tunjukkan dengan dominannya retak di daerah lentur.

### 3. Daktilitas

Berdasarkan Tabel 12 dapat dilihat bahwa substitusi agregat dapat meningkatkan nilai daktilitas balok BMT.

Tabel 12. Data Hasil Perhitungan Daktilitas Balok BMT dengan Substitusi Agregat

No.	Variasi Benda Uji	Kondisi Luluh		Kondisi Ultimit		Daktilitas $\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$	Perbandingan daktilitas terhadap BMT Normal	
		Beban (P)	Lendutan ( $\Delta y$ )	Beban (P)	Lendutan ( $\Delta u$ )			
		ton	mm	ton	mm			
1	NORMAL HSC	23,480	9,700	25,170	23,140	2,386	-	%
2	CSAK	23,070	9,540	25,030	25,930	2,718	113,936	%

Dapat disimpulkan bahwa substitusi agregat dapat digunakan untuk meningkatkan daktilitas beton mutu tinggi yang diketahui memiliki sifat yang getas atau nilai daktilitas yang rendah. Nilai daktilitas dari BMT substitusi agregat menunjukkan kerak cangkang sawit sangat efektif digunakan dan dapat meningkatkan kapasitas beban lentur maksimum.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

1. Hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik lentur dan tegangan-regangan beton dengan substitusi agregat dapat diklasifikasikan kepada beton mutu tinggi yang bersifat getas.
2. Kegagalan balok BMT dengan substitusi agregat sesuai dengan yang direncanakan, yaitu gagal lentur.
3. Balok BMT dengan substitusi agregat dapat meningkatkan nilai lendutan dan daktilitas balok beton mutu tinggi.
4. Pola retak antara balok BMT substitusi agregat lebih banyak, jumlah retaknya yang terjadi secara perlahan serta pendek dibandingkan dengan balok BMT normal. Substitusi agregat juga dapat meningkatkan beban terjadinya retak awal pada balok beton bertulang mutu tinggi.

## 5.2 Saran

Penelitian ini diharapkan dapat dilanjutkan oleh peneliti lain, dengan memperhatikan beberapa hal dan saran sebagai berikut:

Untuk melanjutkan penggunaan substitusi agregat pada beton mutu tinggi sehingga mengurangi sifat getas, dapat digunakan sebagai substitusi agregat halus atau sebagai bahan aditif, serta dapat dibandingkan dengan hasil yang telah diteliti pada penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aulia, T, 1999, Effect of Mechanical Properties of Aggregate on The Ductility of High Performance Concrete, Karsten Deutschman, Lacer No. 4, University of Leipzig, 133 – 147.
- [2] Dewi, E.F., Astari, K.T., dan Lie H.A., 2014, Pengaruh Komposisi Nano Semen Pada Perilaku Beton, Universitas Diponegoro, Semarang.
- [3] Dipohusodo, I, 1996, Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- [4] Indonesia Investment Coordinating Board, 2015, Potensi Kelapa Sawit Di Aceh. (<http://regionalinvestment.bkpm.go.id/newsipid/commodityarea.php?ic=2&ia=11>, diakses Rabu, 5 agustus 2015)
- [5] Kurniawan, A., Analisa Perilaku Geser Balok Beton Ringan Dengan Menggunakan Bongkahan Cangkang Sawit (BCS) Sebagai Pengganti Agregat, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.
- [6] McCormac, J.C., 2001, “Desain Beton Bertulang”, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [7] Muhandi, Sitompul, IR & Rinaldi, 2004, Pengaruh Penambahan Abu Sawit terhadap Kuat Tekan Mortar, Seminar Hasil Penelitian Dosen, Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau
- [8] Mulia, A., 2007, Pemanfaatan Tandan Kosong dan Cangkang Kelapa Sawit sebagai Briket Arang, Universitas Sumutera, Medan.
- [9] Nawy, E.G., 1998, Reinforce Concrete a Fundamental Approach, Mac Graw-Hill Book Company, Sidney.
- [10] Nugraha, P, dan Antoni, (2007), ”Teknologi Beton”, Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- [11] Nugraheni, M.W., 2011, Tinjauan Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Dengan Penambahan Superplasticizier Dan Pengaruh Penggantian Sebagian Semen Dengan Fly Ash, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- [12] Punmia, B.C, Ashok, K.J, and Arun, K.J., 2007, Limit State Design of Reinforced Concrete, Published By. Laxmi Publications (P) LTD. New Delhi. Penerbit: Firewall Media, 2007.